

1

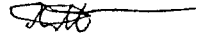
На правах рукописи

ХУСАИНОВ МАРАТ МАНСУРОВИЧ

ВЗАИМНАЯ ПОДСТРОЙКА СВЕРХПРОВОДИМОСТИ И МАГНЕТИЗМА
В НАНОСТРУКТУРАХ ФЕРРОМАГНЕТИК/СВЕРХПРОВОДНИК

01 04 11- физика магнитных явлений

Автореферат



диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук



Казань – 2007 г

Работа выполнена в лаборатории молекулярной фотохимии Казанского
физико-технического института им Е. К. Завойского КазНЦ РАН

Научный руководитель	доктор физико-математических наук, старший научный сотрудник Моисеев Сергей Андреевич
Научный консультант	доктор физико-математических наук, профессор Прошин Юрий Николаевич
Официальные оппоненты	доктор физико-математических наук, профессор Царевский Сергей Леонидович кандидат физико-математических наук, доцент Миронов Геннадий Иванович

Ведущая организация Институт физики металлов
УрО РАН (Екатеринбург)

Защита состоится “30” мая 2007 г в 10⁰⁰ на заседании
диссертационного совета Д 002 191 01 при Казанском физико-техническом
институте им Е. К. Завойского КазНЦ РАН 420029, Казань, Сибирский
тракт, д 10/7

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского физико-
технического института им Е. К. Завойского КазНЦ РАН

Автореферат разослан “27” апреля 2007 г

Ученый секретарь
диссертационного совета



/Шакирзянов М. М./

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность проблемы. Сверхпроводимость и ферромагнетизм - конкурирующие явления дальнего порядка, и их сосуществование в однородных материалах требует специальных достаточно трудновыполнимых условий [1] Поиск альтернативных систем, в которых сочетались бы данные конкурирующие эффекты, привел к активному исследованию искусственно-слоистых материалов FM/S, получаемых чередованием слоев ферромагнитного металла (FM) и сверхпроводника (S), имеющих толщины в десятки и сотни нанометров [1-3] Известно, что благодаря эффекту близости S-слои наводят в FM-слоях сверхпроводящий параметр порядка и образец становится сверхпроводящим в целом Особый интерес представляет изучение многослойных FM/S систем, где могут устанавливаться различные типы взаимного магнитного порядка в разных FM-слоях за счет косвенного взаимодействия их через S-слои В таких системах возникают разнообразные физические процессы, которыми можно управлять, меняя толщину FM- и S-слоев, помещая FM/S структуру во внешнее магнитное поле, меняя температуру или пропуская ток В настоящее время тематика работ по теоретическим и экспериментальным исследованиям в области наноструктур (структур наноскопических размеров) прочно удерживает лидирующее положение в физических публикациях-Перспективы технического применения FM/S наноструктур связаны с целым рядом их необычных свойств, обусловленных многообразным характером проявления взаимодействий электронных и спиновых степеней свободы в таких веществах

Многочисленные эксперименты с двух- и трехслойными FM/S структурами (наноконтактами) и наноконтактами с бесконечным числом слоев (сверхрешетками) выявили нетривиальные зависимости температуры сверхпроводящего перехода T_c , локальной плотности состояний и джозефсоновского тока от толщины слоя ферромагнетика Существующие теории эффекта близости для наноструктур FM/S [4-9], хотя и объясняют ряд экспериментов, но фактически являются одномерными, так как изменения парной амплитуды электронов в плоскости границы раздела металлов они не учитывают Кроме того, эти теории пренебрегают межэлектронным взаимодействием в FM-слоях и в большинстве справедливы только в грязном пределе (в примесных кристаллах), когда длина свободного пробега

электронов мала B то же время, согласно теории Ларкина-Овчинникова-Фульде-Феррелла (ЛОФФ) [10-11], в чистых ферромагнитных металлах может реализоваться сверхпроводящее состояние с осциллирующим параметром порядка B в связи с этим представляет большой интерес исследование конкуренции между однородным сверхпроводящим состоянием Бардина-Купера-Шриффера (БКШ) [12-13] и неоднородным – ЛОФФ, которая будет иметь место в слоистых системах FM/S Кроме того, аномально высокая критическая температура короткопериодных сверхрешеток Gd/La при антиферромагнитном упорядочении намагниченностей FM слоев [14] не находила теоретического обоснования Поэтому возникает необходимость создания новой трехмерной теории эффекта близости, учитывающей межэлектронное взаимодействие как в S-, так и в FM-слоях, и свободной от ограничений на концентрацию примесей и прозрачность границы раздела

В связи с вышеизложенным, тема диссертации, посвященной выводу новой трехмерной краевой задачи для эффекта близости и исследованию на ее основе сверхпроводящих и магнитных свойств искусственно-слоистых структур FM/S в чистом пределе, является очень **актуальной**

Цель диссертации заключается в решении следующих задач

1) Построить теорию эффекта близости для слоистых наноструктур ферромагнитный металл/сверхпроводник (FM/S) в виде трехмерной краевой задачи с учетом межэлектронного взаимодействия в FM-слоях, произвольной концентрации немагнитных примесей и произвольной прозрачности границы раздела FM/S Показать, что уравнения и граничные условия прежней теории эффекта близости для грязных наноструктур FM/S являются предельным случаем новой более общей теории

2) Найти аналитические решения новой краевой задачи для различных вариантов взаимной подстройки сверхпроводимости и магнетизма в чистых двухслойных (FM/S) и трехслойных (FM/S/FM и S/FM/S) наноструктурах Вывести рабочие формулы, описывающие зависимость температуры сверхпроводящего перехода T_c от параметров слоистой системы

3) На основе выведенных формул провести анализ фазовых диаграмм, полученных численными методами, с учетом конкуренции БКШ и ЛОФФ типов сверхпроводимости в чистых двухслойных (FM/S), трехслойных (FM/S/FM и S/FM/S) наносистемах В рамках развитой теории попытаться

объяснить аномально высокое значение температуры сверхпроводящего перехода в сверхрешетках Gd/La

Основные положения, выносимые на защиту

1 Микроскопический вывод дифференциальной краевой задачи для парной амплитуды в FM/S наноструктурах с учетом межэлектронного взаимодействия в FM-слоях, произвольной концентрации немагнитных примесей и произвольной прозрачности границы раздела FM/S. Новые граничные условия, соответствующие непрерывной сшивке парных амплитуд и их потоков только одинаковой симметрии сшиваются между собой только БКШ-решения и только ЛОФФ-решения в FM- и S-слоях.

2 Теория эффекта близости для тонкослойного наноконтакта FM/S в чистом пределе и фазовые диаграммы критической температуры T_c , как функции толщины FM-слоя d_f и S-слоя d_s . Установлено, что при малых величинах d_f (больших d_s) основным состоянием в FM/S контакте является состояние БКШ. При больших d_f (малых d_s) основным в FM-слое становится состояние ЛОФФ, а состояние БКШ оказывается уже возбужденным. В массивных FM/S контактах процессы обмена и взаимного превращения между парами БКШ в S-слое и ЛОФФ в FM-слое на FM/S-границе происходят путем *процессов переброса* через виртуальные поверхностные состояния со смешанным типом спаривания.

3 Обнаружение двух новых состояний с π -фазной сверхпроводимостью в трехслойной FM/S/FM наноструктуре при учете межэлектронного взаимодействия в FM-слоях. Вывод аналитических выражений для критических температур для наносистем, состоящих из трех тонких слоев всех четырех возможных состояний системы FM/S/FM, отличающихся фазами сверхпроводящего и магнитного параметров порядка в соседних FM-слоях, и двух возможных состояний для S/FM/S системы.

4 Объяснение аномально высокого значения температуры сверхпроводящего перехода T_c в тонкослойных сверхрешетках Gd/La при охлаждении в нулевом магнитном поле за счет реализации двух π -магнитных состояний. Определение величины и знака межэлектронного взаимодействия λ_f в ферромагнитном слое Gd.

Научная новизна и практическая значимость работы обеспечиваются следующими задачами, впервые решенными в работе, и возможным применением исследуемых материалов в сверхпроводящей электронике.

1 Впервые дан микроскопический вывод квазиклассической трехмерной краевой задачи для функции Эйленбергера при произвольной концентрации немагнитных примесей, произвольной прозрачности границы раздела FM/S, а также при учете пространственных изменений парной амплитуды как поперек слоев FM и S, так и вдоль границы раздела FM/S

2. На основе исследования эффекта близости в контакте чистых массивных металлов FM и S при произвольной прозрачности границы раздела впервые установлено, что при определенных условиях в толще FM слоя реализуется состояние ЛОФФ, а в глубине S слоя – состояние БКШ. Показано наличие переходной области с поверхностными состояниями, в которой происходит взаимная трансформация между парами ЛОФФ и БКШ, реализующейся путем *процессов переброса* через состоянием со смешанным типом спаривания

3 Впервые построена теория эффекта близости для тонкослойного контакта FM/S в чистом пределе и получены фазовые диаграммы критическая температура T_c , как функция толщины FM слоя d_f и S слоя d_s с учетом межэлектронного взаимодействия в FM слое и трехмерного изменения парной амплитуды

4 Впервые показано, что в трехслойных структурах FM/S/FM существует *четыре* различных состояний ($\phi\chi$). Наличие π -магнитных состояний 0π и 1π позволяет объяснить аномально высокую критическую температуру в короткопериодных сверхрешетках Gd/La

Апробация. Результаты диссертации доложены на следующих научных конференциях: Moscow International Symposium on Magnetism, Moscow, 25-30 June 2005, 24th International Conference on Low Temperature Physics, Orlando, Florida USA, 10-17 August 2005, Международная зимняя школа физиков-теоретиков, Кыштым, 19-25 февраля 2006г, International Conference ‘Low-energy excitations in high T_c superconductors’, 5-7 July, 2006, Stuttgart, Germany, International Conference ‘Nanoscale Superconductivity and Magnetism’ – NSM2006, 6-8 July, 2006, Leuven, Belgium, “8-th International Conference On Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors”, 9-14 July, 2006, Dresden, Germany. Основные результаты работы докладывались и обсуждались также на научных семинарах лаборатории химической физики и заседаниях Ученого Совета КФТИ КазНЦ РАН

Объем и структура диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения и списка литературы, содержащего 77 наименований. Работа изложена на 114 страницах машинописного текста, содержит 8 рисунков.

Публикации. По теме диссертации опубликовано 16 работ, в том числе 5 статей и 11 тезисов докладов.

Личный вклад автора

Представленные в диссертации результаты получены или автором лично, или же он принимал в их получении самое непосредственное участие. Вывод дифференциальной краевой задачи в главе 2, разработанный метод расчета и полученные в главах 3,4 аналитические результаты принадлежат автору. Написание статей происходило совместно с соавторами.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, перечислены основные защищаемые положения, характеризуются научная новизна и значимость полученных результатов, а также излагается краткое описание работы.

В первой главе диссертации, носящей обзорный характер, кратко рассмотрена проблема сосуществования сверхпроводимости и магнетизма в различных однородных и неоднородных системах. Изучены основные механизмы разрушения сверхпроводимости локализованными магнитными моментами и возможные варианты взаимной подстройки сверхпроводимости и магнетизма. Кроме того, подробно описаны результаты прежних теорий эффекта близости для грязных слоистых FM/S наноструктур.

Во второй главе микроскопически выведены интегральная и дифференциальная краевые задачи для функций Горькова и Эйленбергера в структурах ферромагнитный металл/сверхпроводник. В отличие от прежних теорий эффекта близости данная краевая задача является трехмерной. Она учитывает пространственные изменения парной амплитуды не только поперек слоев FM и S (вдоль оси z), но вдоль границы раздела FM/S (x - y плоскость). Также показано, что в грязном пределе новая краевая задача сводится к прежней теории, основанной на уравнениях Узаделя.

В окрестности точки фазового перехода второго рода критическая температура T_c неоднородного сверхпроводника определяется из уравнения самосогласования Горькова для параметра порядка $\Delta(\mathbf{r})$

$$\Delta(\mathbf{r}) = \lambda(z) \pi T \sum_{\alpha \neq \beta} \sum_{\omega} F_{\alpha\beta}(\mathbf{r}, \omega), \quad (1)$$

где $\lambda(z)$ – безразмерный параметр межэлектронного взаимодействия в точке z , штрих у знака суммы означает обрезание на дебаевской частоте ω_D , $\omega = \pi T(2n + 1)$ – мацубаровская частота, $n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$, T – температура и далее всюду будем использовать систему единиц с $\hbar = k_B = M_B = 1$

Методами диаграммной техники получена интегральная краевая задача на функцию Горькова $F_{\alpha\beta}$ в FM/S контакте

$$F_{\alpha\beta}(\mathbf{r}, \omega) = \frac{1}{\pi N(z)} \int K_{\alpha\beta}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) \left[\Delta(\mathbf{r}') + \frac{1}{2\tau(z')} F_{\alpha\beta}(\mathbf{r}', \omega) \right] d\mathbf{r}', \quad (2)$$

где ядро $K_{\alpha\beta}$ удовлетворяет соотношению

$$K_{\alpha\beta}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) = G_{\alpha\alpha}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', \omega) G_{\beta\beta}(\mathbf{r}, \mathbf{r}', -\omega) \quad (3)$$

Здесь $N(z)$ – плотность состояний на уровне Ферми, $v^{-1}(z)$ – скорость рассеяния. Эти функции от z предполагают смену постоянного значения при переходе через границу FM/S ($z = 0$). $G_{\alpha\alpha}$ – функция Грина с совпадающими спиновыми индексами ($\alpha = \uparrow, \downarrow$)

Для чистого однородного ферромагнитного сверхпроводника выводится уравнение на приведенную критическую температуру $t = T_c/T_{c0}$

$$\ln t = \Psi\left(\frac{1}{2}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{-1}^1 \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{2iI - ikv_f x}{4\pi T_{c0} t}\right) dx, \quad (4)$$

где $\Psi(\)$ – дигамма функция, I – величина обменного поля, \mathbf{k} – волновой вектор сверхпроводящей пары. Усреднение в (4) проводится по x – косинусу угла между \mathbf{k} и фермиевской скоростью \mathbf{v}_f . T_{c0} – критическая температура материала в предположении $I = 0$. Заметим, что выражение (4) позволяет получить не только фазовую диаграмму (T_c - I), совпадение которой с известной диаграммой, построенной в рамках формализма Ларкина-Овчинникова [10], говорит о правильности нашего подхода, но и диаграмму (k - I), что позволяет увидеть зарождение пары ЛОФФ после прохождения трикритической точки Лифшица, в которой сходятся нормальная и две сверхпроводящих фазы (БКШ и ЛОФФ)

Возвращаясь к неоднородным системам FM/S в простейшем случае, следуя Ларкину и Овчинникову, мы будем искать решения с одной гармоникой Фурье для $\Delta(\rho, z)$ и $F(\rho, z, \omega)$ (ρ - проекция радиус-вектора на плоскость $x-y$) в областях FM ($-\infty < z < 0$) и S ($0 < z < \infty$) в виде (здесь и далее для величин в этих областях используются индексы s и f)

$$\begin{aligned} \Delta_f(\rho, z) &= \Delta_f(\mathbf{q}_f, z) \exp(i\mathbf{q}_f \rho), & F_f(\rho, z, \omega) &= F_f(\mathbf{q}_f, z, \omega) \exp(i\mathbf{q}_f \rho), \\ \Delta_s(\rho, z) &= \Delta_s(\mathbf{q}_s, z) \exp(i\mathbf{q}_s \rho), & F_s(\rho, z, \omega) &= F_s(\mathbf{q}_s, z, \omega) \exp(i\mathbf{q}_s \rho) \end{aligned} \quad (5)$$

Интегральное уравнение (2) может быть переписано в терминах функции Эйленбергера Φ , которое удастся свести к дифференциальной краевой задаче, включающей дифференциальное уравнение

$$\left[2\tilde{\omega}(z) - v_z(z) \xi_z(z) \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right] \Phi(\mathbf{p}, \mathbf{q}, z, \omega) = 2\Delta(\mathbf{q}, z) + \frac{1}{\tau(z)} F(\mathbf{q}, z, \omega), \quad (6)$$

где v_z - z -компонента скорости на уровне Ферми и ξ - длина когерентности, и соответствующие граничные условия на плоской границе FM/S

$$\xi_z(z) \frac{\partial \Phi(\mathbf{p}, \mathbf{q}, z, \omega)}{\partial z} \Big|_{z=+0} = \frac{\sigma}{2(1-\sigma)} [\Phi(\mathbf{p}, \mathbf{q}_s, +0, \omega) - \Phi(\mathbf{p}, \mathbf{q}_f, -0, \omega)], \quad (7)$$

где σ - квантовомеханическая прозрачность границы раздела

При идеальной прозрачности ($\sigma \rightarrow 1$) мы получаем условие непрерывности для функции Эйленбергера

$$\Phi_s(\mathbf{p}, \mathbf{q}_s, +0, \omega) = \Phi_f(\mathbf{p}, \mathbf{q}_f, -0, \omega) \quad (8)$$

и условие равенства потоков этой функции

$$\xi_{sz} \frac{\partial \Phi_s(\mathbf{p}, \mathbf{q}_s, z, \omega)}{\partial z} \Big|_{z=+0} = \xi_{fz} \frac{\partial \Phi_f(\mathbf{p}, \mathbf{q}_f, z, \omega)}{\partial z} \Big|_{z=-0} \quad (9)$$

После интегрирования по углам и обратного Фурье-преобразования из условия непрерывности (9) получаем

$$\begin{aligned} F_s(+0, \omega) &= F_f(\rho, -0, \omega) \exp(-i\mathbf{q}_f \rho), \\ F_f(\rho, -0, \omega) &= F_s(+0, \omega) \exp(i\mathbf{q}_f \rho) \end{aligned} \quad (10)$$

Верхнее из уравнений (10) отвечает непрерывной сшивке на S/FM границе между БКШ решениями в обоих слоях. Если в FM слое основное состояние ЛОФФ, это уравнение описывает сшивку между основным состоянием БКШ в S-слое и возбужденным БКШ в FM-слое. Нижнее из уравнений (11) соответствует непрерывной сшивке на FM/S границе между ЛОФФ-

решениями в обоих слоях. Когда в FM слое реализуется состояние ЛОФФ с $q_f \neq 0$, оно описывает сшивку между основным состоянием ЛОФФ в FM-слое и возбужденным ЛОФФ-состоянием в S-слое. В случае, когда состояние БКШ реализуется в обоих слоях как основное состояние ($q_f = 0$) верхнее и нижнее уравнения совпадают. Таким образом, эти граничные условия означают, что непрерывная сшивка имеет место только между парными амплитудами одинаковой пространственной симметрии.

В третьей главе на основе полученной в главе 2 дифференциальной краевой задачи рассматриваются контакты двух различных чистых металлов FM и S.

Для контакта двух полубесконечных металлов были выведены уравнения для приведенной критической температуры t в глубине S (11) и FM (12) металлов соответственно.

$$\ln t = \Psi\left(\frac{1}{2}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{-1}^1 \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{i q_s v_s x}{4\pi T_{cs} t}\right) dx, \quad t = \frac{T_c}{T_{cs}}, \quad (11)$$

$$\ln t = \Psi\left(\frac{1}{2}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{-1}^1 \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{i[2I + q_f v_f x]}{4\pi T_{cf} t}\right) dx, \quad t = \frac{T_c}{T_{cf}}, \quad (12)$$

Здесь T_{cs} и T_{cf} – критические температура изолированных БКШ сверхпроводников S и FM, задаваемые константами межэлектронных взаимодействий λ_s и λ_f соответственно. При определении T_{cf} предполагается, что обменное поле $I = 0$.

В приграничном FM/S слое толщиной $\xi_{sz} + \xi_{fz}$, где реализуется периодическая структура (решетка) поверхностных состояний со смешанным БКШ+ЛОФФ механизмом спаривания, критическую температуру в случае металлов FM и S с одинаковой электронной структурой, но разными λ_f , λ_s и I , при идеальной прозрачности ($\sigma = 1$) можно оценить из следующего уравнения.

$$\ln t \approx \frac{\lambda_f}{\lambda_s + \lambda_f} \left[\Psi\left(\frac{1}{2}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{-1}^1 \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{i[2I + q_f v_f x]}{4\pi T_{cs} t}\right) dx \right] + \frac{\lambda_f - \lambda_s}{\lambda_s(\lambda_s + \lambda_f)}, \quad t = \frac{T_c}{T_{cs}} \quad (13)$$

Так при $\lambda_s > \lambda_f > 0$, критическая температура растет как функция z при переходе из FM слоя в S слой от $T_{cf}(I)$, определяемой из (12), до T_{cs} в глубине

С слоя В случае возникновения состояния ЛОФФ в объеме FM слоя и БКШ состояния в S слое с $T_c(I) \sim T_{cs}$, наличие переходной области с поверхностными состояниями приводит к взаимной трансформации между парами ЛОФФ и БКШ, реализующейся путем *процессов переброса* Пара ЛОФФ, переходя из FM слоя в S слой, отдает избыточный 2D импульс \mathbf{q}_f решетке поверхностных состояний и превращается в пару БКШ в S слое В свою очередь пара БКШ, переходя из S слоя в FM слой, принимает импульс \mathbf{q}_f от решетки поверхностных состояний и превращается в пару ЛОФФ в FM слое

Далее рассмотрен наноконтакт двух чистых тонкослойных металлов FM и S ($d_{s(f)} \ll \xi_{s(f)}$) Приведем выражение для критической температуры контакта металлов с одинаковой электронной структурой ($v_s = v_f$ и $N_s = N_f$)

$$\ln t = \frac{c_f(\lambda_f - \lambda_s)}{(c_s\lambda_s + c_f\lambda_f)\lambda_s} + \Psi\left(\frac{1}{2}\right) - \operatorname{Re} \int \frac{d\Omega}{4\pi} \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{2i(c_s J_s + c_f J_f)}{4\pi T_{cs} t}\right), \quad (14)$$

где весовые коэффициенты $c_{s(f)}$, и величины $J_{s(f)}$ определены как

$$c_s = \frac{d_s}{d_s + d_f}, \quad c_s + c_f = 1 \quad (15)$$

$$J_s = I_s + \mathbf{q}_s \mathbf{v}_{s\perp}; \quad J_f = I_f + \mathbf{q}_f \mathbf{v}_{f\perp} \quad (16)$$

Подчеркнем, что общее выражение (14) позволяет рассмотреть эффект близости между двумя ферромагнитными сверхпроводниками FM и S с разными межэлектронными взаимодействиями λ_f , λ_s и обменными полями I_f , I_s

Для определенности рассмотрим конкуренцию между БКШ и ЛОФФ типами спаривания в FM/S контакте, где обменного поля в S слое нет, т е $I_s = 0$, а $I_f = I$ В этом случае первое слагаемое в (14) соответствует результату де Жена [15] для контакта обычного нормального металла со сверхпроводником Второй и третий члены описывают понижение T_c вследствие парамагнитного эффекта обменного поля I и его частичную компенсацию вследствие возникновения состояния ЛОФФ с $q_f = q \neq 0$ Построены фазовые диаграммы критическая температура T_c и q как функции толщины FM-слоя d_f и S-слоя d_s Конкретное значение q находится из условия максимума T_c для каждого значения d_f или d_s Установлено, что при малых d_f (больших d_s) *основным состоянием* в обоих слоях FM и S является состояние БКШ, а состояние ЛОФФ с более высокой энергией (низкой T_c)

является *возбужденным* В то же время при больших d_f (малых d_s) основным становится состояние ЛОФФ с осциллирующей вдоль FM/S-границы парной амплитудой

В **четвертой главе** исследованы новые решения краевых задач для функций Эйленберга в чистых тонкослойных FM/S/FM и S/FM/S наноконтактах В отличие от прежних теорий здесь учитывается межэлектронное взаимодействие в FM слоях, что приводит к новым π -фазным вариантам сосуществования сверхпроводимости и ферромагнетизма порождая новую классификацию состояний в FM/S/FM трислоях Данная структура характеризуется четырьмя различными состояниями ($\phi\chi$), различающиеся фазами сверхпроводящего (ϕ) и магнитного (χ) параметров порядка в соседних FM слоях 00, $\pi 0$, 0π , $\pi\pi$ В двух последних намагниченности FM слоев антипараллельны

Для всех возможных состояний трислоя FM/S/FM выведены уравнения для критической температуры Для состояния 00 такое уравнение на $t = t^{00}$ совпадает с уравнением (14) при этом здесь и ниже в определении c_f и c_s (15) d_f нужно заменить на $2d_f$ Для состояний 0π , $\pi\pi$, $\pi 0$ соответствующие температуры определяются из

$$\ln t^{0\pi} = \frac{c_f(\lambda_f - \lambda_s)}{(c_s\lambda_s + c_f\lambda_f)\lambda_s}, \quad \ln t^{\pi\pi} = -\frac{c_f}{\lambda_s c_s}, \quad (17)$$

$$\ln t^{\pi 0} = -\frac{c_f}{c_s\lambda_s} + \Psi\left(\frac{1}{2}\right) - \operatorname{Re} \int \frac{d\Omega}{4\pi} \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{2i(c_s J_s + c_f J_f)}{4\pi T_{cs} t^{\pi 0}}\right) \quad (18)$$

Во всех четырех случаях весовые коэффициенты c_f и c_s находятся из выражений (15) с точностью до замены $d_f \rightarrow 2d_f$

Интересно отметить, что критическая температура $\pi\pi$ состояния вследствие реализации π -фазной сверхпроводимости не зависит от величины $|\lambda_f|$ Кроме того, если $\lambda_f < 0$, то критическая температура $t^{\pi\pi}$ выше, чем $t^{0\pi}$ В случае $\lambda_f = 0$ эти 0π и $\pi\pi$ состояния совпадают одно с другим Возможность двух 0π и $\pi\pi$ состояний, различных по сверхпроводимости в FM/S/FM трехслойных структурах, очень неожиданна, поскольку обычно полагается, что π -фазная сверхпроводимость в таких системах принципиально невозможна С одной стороны, этот факт означает, что в FM/S мультислоях взаимодействие между соседними слоями обеспечивается сверхпроводящими корреляциями, т е роль истинного параметра порядка играет скорее парная

амплитуда $F(\rho, z, \omega)$, чем $\Delta(\rho, z)$. С другой стороны, существование таких парамагнитных состояний (17) приводит нас к объяснению неожиданно слабого подавления сверхпроводимости, которое было обнаружено в короткопериодных сверхрешетках Gd/La [14]. Известно [2], что сверхрешетка в числе своих состояний содержит состояния трехслойной структуры FM/S/FM. Измеренная T_c сверхрешетки Gd/La была 5 K, что совпадает с критической температурой массивного образца La. Это означает, что в сверхрешетке Gd/La реализуется скорее состояние типа 0π , чем $\pi\pi$ и $\lambda_f \approx \lambda_s$, поскольку $T_c^{0\pi} \approx T_{cs}$ в первом уравнении (17). Это означает, что электрон-электронное взаимодействие в изолированной пленке Gd отвечает притяжению, но его собственная сверхпроводимость подавлена сильным обменным полем $I \gg T_c$. Однако, вследствие компенсации обменного поля в 0π состоянии сверхрешетки Gd/La сверхпроводимость пленки Gd восстанавливается вновь.

Что касается 00 и $\pi 0$ состояний, то они обладают усиленным парамагнитным эффектом обменного поля I , и, в близкой аналогии со случаем FM/S контактов, допускают конкуренцию между гладким БКШ и осциллирующим ЛОФФ состояниями с ростом толщины FM слоев d_f . Эти 00 и $\pi 0$ состояния имеют более низкую T_c по отношению к ранее рассмотренным 0π и $\pi\pi$ состояниям. Вероятно, они могли бы наблюдаться в присутствии внешнего магнитного поля $H > H_{coer}$ (где H_{coer} - коэрцитивное поле FM пленки) если, конечно, среднее обменное поле $c_f I$ не слишком сильное. Действительно, при охлаждении в поле сверхрешетки Gd/La сверхпроводящий переход подавлялся [14] в соответствии с нашей теорией.

В S/FM/S наноконтактах возникают только два состояния - 0 - и π -фазные по сверхпроводимости. Выпишем для них выведенные нами уравнения для критических температур

$$\ln t^0 = \frac{c_f(\lambda_f - \lambda_s)}{(c_s\lambda_s + c_f\lambda_f)\lambda_s} + \Psi\left(\frac{1}{2}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{-1}^1 dx \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{ic_f(2I + xq_f v_f)}{4\pi T_{cs} t^0}\right), \quad (19)$$

$$\ln t^\pi = \frac{c_f\lambda_f - \lambda_s}{c_f\lambda_f\lambda_s} + \Psi\left(\frac{1}{2}\right) - \frac{1}{2} \operatorname{Re} \int_{-1}^1 dx \Psi\left(\frac{1}{2} + \frac{ic_f(2I + xq_f v_f)}{4\pi T_{cs} t^\pi}\right), \quad (20)$$

где c_s и c_f определены формулой (15), где d_s нужно заменить на $2d_s$,

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1 Впервые дан микроскопический вывод квазиклассической трехмерной краевой задачи для функции Эйленберга $\Phi(\mathbf{p}, \mathbf{q}, z, \omega)$ при произвольной концентрации немагнитных примесей, произвольной прозрачности границы раздела FM/S, при учете межэлектронного взаимодействия в FM-слое, а также при учете пространственных изменений парной амплитуды как поперек слоев FM и S, так и вдоль границы раздела FM/S. Данная краевая задача включает дифференциальные уравнения второго порядка для $\Phi(\mathbf{p}, \mathbf{q}, z, \omega)$ в слоях FM и S, а также граничные условия, связывающие поток функции Эйленберга с ее скачком на поверхности раздела FM/S.

2 Впервые указано на *спонтанное нарушение трансляционной симметрии* в плоскости границы раздела FM/S. В случае идеальной прозрачности новые граничные условия соответствуют непрерывной сшивке парных амплитуд и их потоков только одинаковой симметрии, т.е. непрерывно сшиваются между собой только БКШ-решения и только ЛОФФ-решения в FM- и S-слоях. В случае возникновения состояния ЛОФФ в объеме FM слоя и БКШ состояния в S слое с $T_c(I) \sim T_{cs}$, наличие переходной области ($\xi_{sz} + \xi_{sz}$) с поверхностными состояниями приводит к взаимной трансформации между парами ЛОФФ и БКШ, реализующейся путем *процессов переброса*.

3 Впервые построена теория эффекта близости для тонкослойного контакта FM/S в чистом пределе и получены фазовые диаграммы критическая температура T_c , как функция толщины FM-слоя d_f и S-слоя d_s . Показано, что при малых d_f (больших d_s) *основным состоянием* в обоих слоях FM и S является состояние БКШ, а состояние ЛОФФ с более высокой энергией (низкой T_c) является *возбужденным*. В то же время при больших d_f (малых d_s) основным становится состояние ЛОФФ с осциллирующей вдоль FM/S-границы парной амплитудой.

4 Показано, что в случае трехслойных структур FM/S/FM существует четыре различных состояний ($\phi\chi$), которые различаются фазами ϕ и χ сверхпроводящего (Δ) и магнитного (I) параметров порядка в соседних FM слоях. Существование π -магнитных состояний 0π и $\pi\pi$ впервые позволило объяснить на основе нашей теории неожиданно слабое подавление сверхпроводимости, которое было обнаружено в короткопериодных сверхрешетках Gd/La и определить величину и знак λ_f . С другой стороны полное подавление сверхпроводящего перехода при охлаждении в

магнитном поле в сверхрешетке Gd/La [14] также находится в соответствии с нашей теорией. Напротив в трехслойных системах S/FM/S возможны только два состояния, которые отличаются только фазами ϕ сверхпроводящего (Δ_s) параметра порядка в соседних S слоях.

5 Для всех рассмотренных систем выведены универсальные уравнения на критические температуры, которые справедливы для произвольного сочетания контактирующих металлов: обычный БКШ сверхпроводник, несверхпроводящий ферромагнитный металл, нетрадиционный ЛОФФ сверхпроводник.

Данные исследования проведены при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 05-02-16369 "Неоднородные сверхпроводящие и магнитные состояния в наноструктурах ферромагнетик - сверхпроводник". Результаты работы использованы в научных отчетах по данной теме.

ЦИТИРУЕМАЯ ЛИТЕРАТУРА

- [1] Buzdin, A I Proximity effects in superconductor-ferromagnet heterostructures / A I Buzdin // Rev Mod Phys - 2005 -Vol 77 - P 935-976
- [2] Изюмов, Ю А Конкуренция сверхпроводимости и магнетизма в гетероструктурах ферромагнетик/ сверхпроводник/Ю А Изюмов, Ю Н Прошин, М Г Хусаннов//УФН. - 2002 -Т 172 - № 2 - С 113-154
- [3] Bergeret, F S Odd triplet superconductivity and related phenomena in superconductor-ferromagnet structures / F S Bergeret, A F Volkov, K B Efetov // Rev Mod Phys – 2005 – V 77 – P 1321-1373
- [4] Radovic, Z Transition temperature of superconductor-ferromagnet superlattices / Z Radovic, M Ledvij, L Dobrosavljevic-Grujic, A I Buzdin, J R Clem // Phys Rev B – 1991 – Vol 44 - № 2 – С 759-764
- [5] Буздин, А И Структуры сверхпроводник-ферромагнетик / А И Буздин, Б Вуйичич, М Ю Куприянов // ЖЭТФ – 1992 –Т 101 – Вып 1 – С 231-240
- [6] Прошин, Ю Н О проявлениях состояния Ларкина-Овчинникова-Фулдере-Феррелла в биметаллических структурах ферромагнетик-сверхпроводник / Ю Н Прошин, М Г Хусаннов // Письма в ЖЭТФ – 1997 – Т 66 -№ 8 – 527-532

- [7] Khusainov, M G Possibility of periodically reentrant superconductivity in ferromagnet/superconductor layered structures //M G Khusainov, Yu N Proshin // Phys Rev B – 1997. – Vol 56. - № 22 – P 15746-15749
- [8] Прошин, Ю Н О природе немонотонного поведения критической температуры в биметаллических структурах ферромагнетик-сверхпроводник /Ю Н Прошин, М Г Хусаинов // ЖЭТФ -1998 –Т 113 – С 1708-1730
- [9] Tagirov, L R Proximity effect and superconducting transition temperature in superconductor/ferromagnet sandwiches / L R Tagirov // Physica C – 1998 – Vol 307 P 145-163
- [10] Ларкин, А И Неоднородное состояние сверхпроводников / А И Ларкин, Ю Н Овчинников // ЖЭТФ – 1964 –Т 47 – Вып 3(9) –С 1136-1146
- [11] Fulde, P Superconductivity in strong spin-exchange field / P Fulde, R A Ferrell //Phys Rev – 1964 – Vol 135 -№ 3А – P 550-563
- [12] Bardeen, J Theory of superconductivity / J Bardeen, L N Cooper J R Schriffer // Phys Rev – 1957 –Vol 108 -№ 5 – P 1175 – 1204
- [13] Шриффер, Дж Теория сверхпроводимости / Дж Шриффер М Наука, 1970 – 311 с
- [14] Goff, J P Interplay between superconductivity and magnetism in Gd/La superlattices / J P Goff, P P Deen, R C C Ward, M R Wells, S Langridge, R Dalgeish, S Foster, S Gordeev // J Magn and Magn Matter – 2002 – V 240 – P 592-594
- [15] de Gennes, P G Boundary effects in superconductors / P G de Gennes// Rev Mod Phys – 1964 – V 36 - № 1 – P 225-237

ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

- 1 Khusainov, M G Inhomogeneous superconducting states and umklapp processes in ferromagnet/ superconductor nanostructures / M G Khusainov, M M Khusainov, Yu N Proshin // J Magn and Magn Mater - 2006 – V 300 – P 243-246
- 2 Khusainov, M G Spin screening of magnetic moments and inverse proximity effect in ferromagnet/superconductor nanostructures / M G Khusainov, N G Fazleev, M M Khusainov, Y N Proshin // J Appl Phys - 2006 – V 99 – 08M506-3

- 3 Khusainov, M.G 2D inhomogeneous superconducting states and Umklapp processes in ferromagnet/superconductor nanostructures / M G Khusainov, N G Fazleev, M M Khusainov, Y N Proshin // AIP Conf Proc Ser - 2006 – V 850 –P.899-900
- 4 Khusainov, M M Spin screening and inverse proximity effect in F/S nanostructures / M M Khusainov, E L Parfenova, Y N Proshin, M G Khusainov / AIP Conf Proc Ser - 2006 – V 850 –P 909-910
- 5 Parfenova, E L Exchange model of proximity effect in ferromagnet/superconductor nanostructures / E L Parfenova, M M Khusainov, D S Sattarov, Y N Proshin, M G Khusainov // Moscow International Symposium on Magnetism Proceedings (Supplementary Issue) June 25-30, 2005, Moscow - Moscow, 2005 - P.90-94
- 6 Khusainov, M G 2D inhomogeneous superconducting states and umklapp processes in ferromagnet/superconductor nanostructures / M G Khusainov, N G Fazleev, Yu N Proshin, M M Khusainov // 24th Internat Conf on Low Temp Physics, Orlando, Florida USA, August 10 - 17, 2005, Official Conference books/Scientific Abstracts - Orlando, USA - P 17
- 7 Khusainov, M M Spin screening and inverse proximity effect in F/S nanostructures / M M Khusainov, N G Fazleev, Yu N Proshin, M G Khusainov // 24th Internat Conf on Low Temp Physics, Orlando, Florida USA, August 10 - 17, 2005, Official Conference books/Scientific Abstracts - Orlando, USA - P 18
- 8 Khusainov, M G Inhomogeneous superconducting states and umklapp processes in ferromagnet/superconductor nanostructures / M G Khusainov, Yu N Proshin, M M Khusainov // Moscow International Symposium on Magnetism Book of Abstracts June 25-30, 2005, Moscow - Moscow, 2005 - P 14-15
- 9 Khusainov, M M Coexistence of inhomogeneous magnetism and superconductivity in ferromagnetic insulator/superconductor nanostructures / M M Khusainov, S A Moiseev, Yu N Proshin, M G Khusainov // Moscow International Symposium on Magnetism Book of Abstracts June 25-30, 2005, Moscow – Moscow, 2005 - P 56- 57
- 10 Khusainov, M G Spontaneously Broken Symmetry and Proximity Effect in Ferromagnet/Superconductor Nanostructures / M G Khusainov, M M Khusainov, Y N Proshin // Book of Abstracts, Intern Conference “Nanoscale

- Superconductivity and Magnetism 2006” July 6-8, 2006, Leuven (Vaalbeek) - Leuven (Vaalbeek), 2006 - P 99
- 11 Khusainov, M G Spin Screening and Inverse Proximity Effect in Ferromagnet/Superconductor Nanostructures / M G Khusainov, M M Khusainov, Y N Proshin // Abstract Booklet, 8th Intern Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M2S- HTSC VIII), Dresden, July 9-14, 2006 – Dresden, 2006 - P 127
 - 12 Khusainov, M M Spontaneously broken symmetry and inhomogeneous superconducting states in ferromagnet/ superconductor nanostructures / M M Khusainov, M G Khusainov, Yu N Proshin // Abstract Booklet, 8th Intern Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M2S- HTSC VIII), Dresden, July 9-14, 2006 – Dresden, 2006 - P 280
 - 13 Khusainov, M M Spin screening and inverse proximity effect in ferromagnetic insulator/ superconductor nanostructures / M M Khusainov, Y N Proshin, M G Khusainov/ Abstract Booklet, 8th Intern Conference on Materials and Mechanisms of Superconductivity and High Temperature Superconductors (M2S- HTSC VIII), Dresden, July 9-14, 2006 – Dresden, 2006 - P 403
 - 14 Хусаинов М Г Спонтанное нарушение симметрии и неоднородные сверхпроводящие состояния в наноструктурах ферромагнетик/сверхпроводник / М Г Хусаинов, М М Хусаинов, Ю Н Прошин // Тезисы докладов 34 Совещания по физике низких температур (НТ-34), Лео, 26-30 сентября 2006 г - г Ростов на Дону , 2006 – С 227-228
 - 15 Хусаинов, М Г Спонтанное нарушение симметрии и неоднородные сверхпроводящие состояния в наноструктурах ферромагнетик/сверхпроводник / М Г Хусаинов, М М Хусаинов, Ю Н Прошин// Тезисы докладов XXXI Международной зимней школы физиков-теоретиков «Коуровка-2006», Кыштым, Челяб обл 19-25 февраля 2006 г – Кыштым, 2006 - С 104
 - 16 Хусаинов, М Г Спиновое экранирование и обратный эффект близости в наноструктурах ферромагнетик/сверхпроводник / М Г Хусаинов, Ю Н Прошин, М М Хусаинов // Тезисы докладов XXXI Международной зимней школы физиков-теоретиков «Коуровка-2006», Кыштым, Челяб обл 19-25 февраля 2006 г – Кыштым, 2006 - С 105

Лицензия на полиграфическую деятельность №0128 от 08.06.98г
выдана Министерством информации и печати Республики Татарстан
Подписано в печать 25.04.2007 г
Форм бум 60x84 1/16 Печ л 1 Тираж 100 Заказ 117

Минитипография института проблем информатики АН РТ
420012, Казань, ул. Чехова, 36